

4. Теория и технология методов литья под регулируемым газовым давлением/Б. С. Чуркин, Э. Б. Гофман, Н. В. Шестаков и др.; Свердлов.инж.-пед.ин-т. Свердловск, 1990. – 207 с.

5. Чуркин Б. С., Горшков А. А. Обеспечение устойчивости машинных экспериментов по исследованию кинетики затвердевания отливок и гидродинамики заполнения форм по методу потоков//Совершенствование литейных процессов: Материалы междунар. конф. литейщиков, 18–19 марта 1999 г.– Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. техн. ун-та, 1999. – С. 123–128.

**А. Б. Чуркин, С. Б. Чуркин,  
Ю. И. Категоренко, Э. Б. Гофман**

## **УСЛОВИЯ КАЧЕСТВЕННОГО ЗАПОЛНЕНИЯ ФОРМ ПРИ ЛЬЕ ПОД РЕГУЛИРУЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТЛИВОК СО ЗНАЧИТЕЛЬНЫМИ ПЕРЕПАДАМИ ТОЛЩИН СТЕНОК**

При литье под регулируемым давлением заполнение форм осуществляется под действием изменяющегося во времени перепада газового давления на расплав. При этом, как правило, обеспечивается постоянный для всего этапа заполнения формы темп изменения перепада давлений. При литье вакуумным всасыванием управление изменением разрежения в вакуумной камере осуществляется путем установки в вакуумной системе дросселирующего устройства соответствующего проходного сечения. Разрежение при этом изменяется по близкому к линейному апериодическому закону

$$\Delta P_{\kappa} = P_a - P_{\kappa} = (P_a - P_{\kappa})(1 - \exp(-\beta t)), \quad (1)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление;

$P_{\kappa}$  – давление в вакуумной камере;

$\beta$  – газодинамический коэффициент, зависящий при постоянном объеме вакуумной камеры  $V_{\kappa}$  и давлении в ресивере от площади проходного сечения дросселирующего устройства  $\omega_d$ .

При литье под низким давлением применяются регуляторы, обеспечивающие линейный характер изменения перепада газового давления на расплав

$$\Delta P_{\kappa} = mt,$$

где  $m$  – постоянная, на которую настраивается регулятор при изготовлении данной отливки.

Расчет кинетики заполнения форм чаще всего выполняют с использованием равновесных формул, основанных на допущении, что уровень расплава  $h$  практически строго совпадает с равновесными значениями, уравнивающими перепад давления  $\Delta P_k$ , т.е.

$$h = h_p = \frac{\Delta P_k}{\rho g}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкого сплава.

Как показала практика применения литья под регулируемым давлением, наибольшие проблемы возникают при получении отливок со значительными перепадами толщин стенок. Для обеспечения заполняемости тонкостенных элементов отливки необходим высокий темп изменения перепада давлений, т.е. нужно настроить газовую систему на высокие значения коэффициентов  $\beta$  или  $m$ . При этом в местах перехода потока из нижних толстостенных участков полости формы в тонкостенные происходит увеличение скорости сплава, вызванное сужением потока. Оно приводит к фонтанированию сплава в форме. Это вызывает колебания уровня сплава в форме, захват газов и приводит к дефектам в отливке. Этого можно избежать, снизив значение коэффициента  $\beta$ . Однако при этом не будет обеспечена заполняемость тонкостенных элементов, а в местах расширения потока при больших перепадах сечений полости формы развивается интенсивное фонтанирование под затопленный уровень.

При значительных перепадах площадей полости формы уровень сплава существенно отклоняется от равновесных значений  $h_p$  и погрешность применения формулы (2) для расчета кинетики заполнения формы может достигать 100 % и более [2].

Вместе с тем в настоящее время для практических инженерных расчетов кинетики заполнения форм невозможно разработать универсальную методику, не основанную на использовании формулы (2). Существующий метод управления заливкой, при котором заполнение формы осуществляется при постоянном значении коэффициента  $\beta$  в течение всего процесса, применим при следующих ограничениях отношения площадей элементов отливки

$$0,5 < \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} < 6 \text{ при } \beta < 0,03 \text{ с}^{-1},$$

где  $\omega_{i+1}$  и  $\omega_i$  – площади сечения вышерасположенного и нижерасположенного по потоку участков полости формы [2].

Вопросу разработки оптимального управления заполнением форм при литье под регулируемым давлением, учитывающего изменение площади сечения потока в соответствии с конфигурацией отливки, посвящено много работ [1, 2]. Однако предложенные законы изменения перепада давлений на расплав очень сложны и ввиду кратковременности процесса заливки трудно реализуемы на практике. Кроме того, нуждаются в уточнении и конкретизации принятые критерии оптимизации.

В качестве критериев оптимизации были приняты:

- ограничение фонтанирования сплава до уровня, при котором погрешность применения для расчета кинетики заполнения равновесной формулы (2) не превышает 10 %;
- исключение колебаний уровня сплава в полости формы;
- обеспечение качественного заполнения без образования спаев и недоливов.

Ниже рассмотрены вопросы оптимизации заливки форм при литье вакуумным всасыванием.

При оптимальном управлении предполагается дискретное изменение гидродинамического коэффициента  $\beta$  в моменты прохождения потока через участки с резкими изменениями сечений полости формы. Изменение значений  $\beta$  обеспечивается последовательным включением диафрагм с разными проходными сечениями в вакуумной сети [3].

Как показали расчеты и эксперименты [2], при заполнении протяженных участков с постоянным поперечным сечением (например, металлопровод) колебания скорости сплава относительно ее равновесных значений

$$\tilde{v} = \frac{d(\Delta P_p)}{dt} \cdot \frac{1}{\rho g} = \frac{\Delta P_p \cdot \beta \cdot \exp(-\beta t)}{\rho g}$$

быстро затухают, и уровень сплава практически строго изменяется в соответствии с равновесным значением

$$h = \frac{\Delta P_p (1 - \exp(-\beta t))}{\rho g},$$

где  $\Delta P_p = P_a - P_p$ .

При постоянном значении  $\beta$  на участках с резким расширением или сужением потока темп изменения равновесных скоростей не изменяется, а начальные значения скоростей  $v_0$  при заполнении данного участка резко изменяются.

Основная причина больших погрешностей формулы (2) и колебаний уровня состоит в значительном отклонении начальной скорости  $v_0$  заполнения формы от ее равновесного значения  $\tilde{v}$ . При резком расширении потока

$$v_0 = \tilde{v} \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}} < \tilde{v},$$

что вызывает резкое увеличение скорости сплава под действием большого превышения действующего перепада давлений над гидростатическим давлением расплава. При резком сужении потока начальная скорость превышает равновесное значение, что приводит к фонтанированию расплава в открытое пространство полости формы с последующим резким падением скорости и обрушиванием потока вниз, т.е. к колебаниям сплава.

Для уменьшения развития этих явлений целесообразно в моменты прохождения потоком участков увеличения сечения полости формы снизить  $\beta$ , а в местах сужения потока увеличить  $\beta$ . Рассмотрим реализацию этого подхода для случая заполнения отливки, включающей нижний толстостенный участок с площадью  $\omega_1$  и верхний тонкостенный участок с сечением  $\omega_2$ .

Заполнение металлопровода осуществляется при значении газодинамического коэффициента  $\beta = \beta_m$ . Скорость сплава в конце заполнения металлопровода  $v_m$  с достаточной точностью может быть рассчитана по формуле

$$v_m = \frac{\Delta P_p \cdot \beta_m \cdot \exp(-\beta_m t_m)}{\rho g}, \quad (3)$$

где  $t_m$  – продолжительность заполнения металлопровода.

Если заполнение нижней части полости формы осуществлять при прежнем значении коэффициента  $\beta$ , то равновесная скорость, характеризующая темп изменения перепада давлений будет равна

$$\tilde{v}_1 = \frac{\Delta P_p \cdot \beta_m \cdot \exp(-\beta_m t_m)}{\rho g} \cdot \exp(-\beta_m t),$$

где  $t$  – время, отсчитываемое с начала заполнения нижней части формы.

Начальная скорость подъема уровня расплава при заполнении нижней части формы равна

$$\tilde{v}_{01} = \frac{\Delta P_p \cdot \beta_m \cdot \exp(-\beta_m t_m) \cdot \omega_m}{\rho g \cdot \omega_1},$$

где  $\omega_m$  – площадь сечения металлопровода.

Очевидно, что  $v_{01} < \tilde{v}_1$ . При этом отклонение  $v_{01}$  от  $\tilde{v}_1$  составляет

$$\Delta v = \tilde{v}_1 - v_{01} = \frac{\Delta P_p \cdot \beta_m \cdot \exp(-\beta_m t_m)}{\rho g} \left( \exp(-\beta_m t) - \frac{\omega_m}{\omega_1} \right).$$

Оно будет тем больше, чем больше отношение площадей  $\omega_1/\omega_m$ , т.е. чем сильнее расширение потока. Это обуславливает значительные амплитуды колебаний значений скорости от  $v_1$  до ее равновесного значения  $\tilde{v}_{01}$  и существенные погрешности применения формулы (2).

Для обеспечения более плавного заполнения и уменьшения погрешности целесообразно снизить значение коэффициента  $\beta$  в момент окончания заполнения металлопровода до значения, обеспечивающего равенство равновесной  $\tilde{v}_1$  и начальной  $v_{01}$  скоростей при  $t=0$ . Приравнявая  $\tilde{v}_1$  при значениях  $\beta=\beta_1$  и  $v_{01}$ , получаем

$$\frac{\Delta P_p \cdot \beta_1 \cdot \exp(-\beta_m t_m)}{\rho g} = \frac{\Delta P_p \cdot \beta_m \cdot \exp(-\beta t_m) \cdot \omega_m}{\rho g \cdot \omega_1} \quad \text{или} \quad \beta_1 = \frac{\beta_m \cdot \omega_m}{\omega_1}. \quad (4)$$

Установление начальной скорости  $v_{01}$  происходит не мгновенно, так как растекание жидкого сплава в нижней части полости формы происходит во времени. Поэтому в формулу (4) следует ввести некоторый поправочный коэффициент  $K_1$ . С учетом этого имеем

$$\beta_1 = \frac{\beta_m \cdot \omega_m}{\omega_1} \cdot K_1. \quad (5)$$

Коэффициент  $K_1$  зависит от  $\beta_m$ , высоты нижнего участка полости формы  $H_n$  и отношения площадей  $\omega_1/\omega_m$ . Чтобы получить уравнение регрессии для расчета  $K_1$ , была выполнена серия машинных экспериментов по решению нестационарных уравнений регрессии для металлопровода и нижнего участка полости формы с целью определения значений  $\beta_1$ , обеспечивающих погрешность

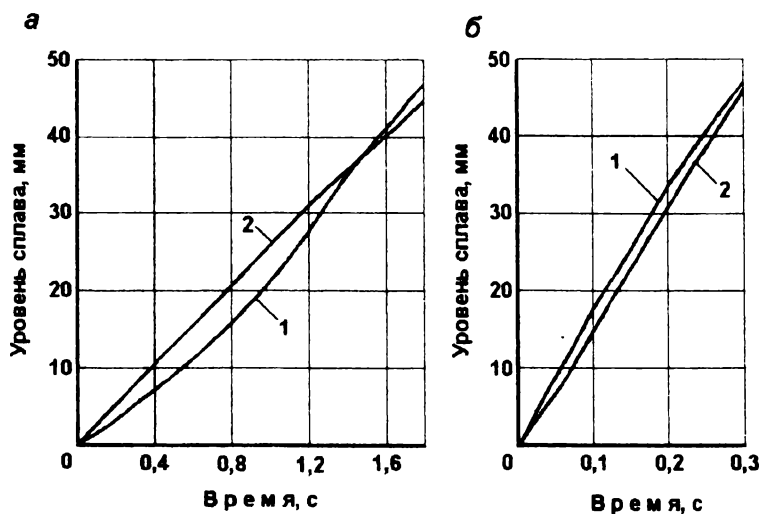


Рис. 1. Кинетика заполнения полости формы: а – нижней части при  $\beta = 0,01 \text{ с}^{-1}$ ; б – верхней части при  $\beta = 0,06 \text{ с}^{-1}$ ; 1 – фактические данные; 2 – расчетные данные

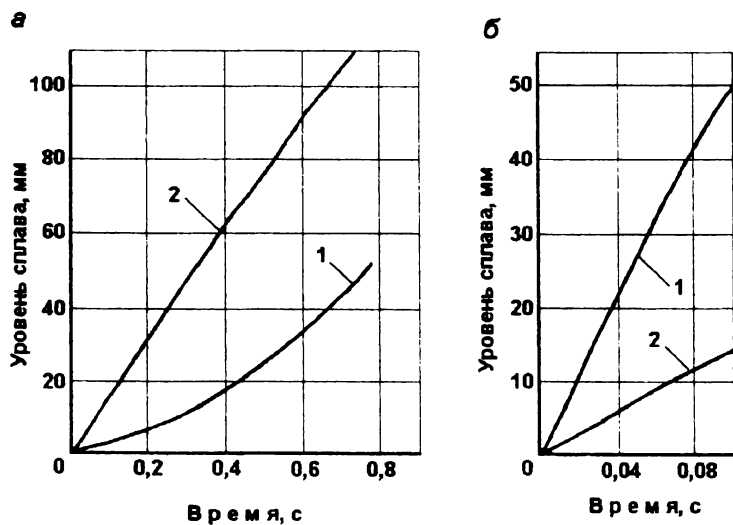


Рис. 2. Кинетика заполнения полости формы при фиксированном значении  $\beta = 0,06 \text{ с}^{-1}$ : а – нижней части; б – верхней части; 1 – фактические данные; 2 – расчетные данные

формулы (2), не превышающую 10 %. В результате обработки данных получено следующее уравнение регрессии:

$$K_1 = 1,169 - 0,006X_1 - 0,106X_2 - 0,03X_3 + 0,07X_1X_2 - 0,08X_1X_3 + 0,03X_2X_3, \quad (6)$$

где  $X_1 = \frac{\beta_1 - 0,007}{0,003}$ ;  $X_2 = \frac{H_n - 7}{4}$ ;  $X_3 = \frac{\omega_1 / \omega_n - 6}{4}$ .

При заполнении верхней части полости формы при сужении потока начальная скорость увеличивается и превышает равновесную, что приводит к фонтанированию сплава и затем к его опусканию в полости формы, т.е. к колебаниям уровня. Поэтому в конце заполнения нижней части полости формы необходимо увеличить значение коэффициента  $\beta$  до  $\beta = \beta_2$ .

Проводя аналогичные рассуждения, получаем формулу

$$\beta_2 = \frac{\beta_1 \cdot K_2}{\omega_2 / \omega_1}, \quad (7)$$

$$K_2 = 0,887 + 0,094X_1 - 0,038X_2 + 0,05X_3 - 0,07X_4 - 0,138X_5 - 0,094X_1X_2 + 0,044X_1X_3 - 0,088X_1X_4 - 0,106X_1X_5 - 0,063X_2X_3 + 0,119X_2X_4 - 0,125X_2X_5 - 0,069X_3X_4 - 0,056X_4X_5;$$

$$X_4 = \frac{\omega_2 / \omega_1 - 0,3}{0,2}; X_5 = \frac{H_n - 7}{4}.$$

где  $H_n$  – высота верхней части полости формы, см.

Уравнения (5)–(7) позволяют определить значения газодинамического коэффициента  $\beta$  для разных участков полости формы, обеспечивающих качественное (без колебаний уровня и фонтанирования) заполнение формы при достаточной точности реализации заданной продолжительности заливки.

Таким образом, универсальный способ управления заливкой сводится к изменению  $\beta$  в момент перехода расплава через участки сужения и расширения сечений отливки. Методика дискретного изменения величины  $\beta$  рассмотрена в работе Б. С. Чуркина и Ю. И. Категоренко [3].

Для иллюстрации возможностей разработанного метода управления заливкой приведены расчетные и экспериментальные данные по кинетике заполнения формы сплавом при следующих условиях:  $H_n=5$  см;  $H_0=5$  см;  $\omega_2/\omega_1=0,2$ ;  $\omega_1/\omega_n=6$ ;  $\beta_2=0,06$  с<sup>-1</sup> (рис. 1, 2).

Разработанная методика обеспечивает необходимую точность расчета и плавное заполнение всех участков формы.

### Литература

1. Борисов Г. П. Давление в управлении литейными процессами. – Киев: Наук. думка, 1988. – 272 с.
2. Теория и технология методов литья под регулируемым газовым давлением/Б. С. Чуркин, Э. Б. Гофман, Н. В. Шестаков и др.; Свердлов. инж.-пед. ин-т. – Свердловск, 1990. – 207 с.
3. Чуркин Б. С., Категоренко Ю. И. Автоматическое управление кинетикой заполнения формы при литье вакуумным всасыванием// Совершенствование литейных процессов: Материалы междунар. конф. литейщиков, 18–19 марта 1999 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал.гос.техн.ун-та, 1999. – С. 144– 148.

**С. Е. Жолудев,  
Б. С. Чуркин,  
А. А. Серебряков**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЫХ МОСТОВИДНЫХ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ НА ИМПЛАНТАТАХ ПРИ КОНЦЕВЫХ ДЕФЕКТАХ НИЖНЕЙ ЧЕЛЮСТИ ПУТЕМ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Возмещение дефектов зубных рядов при протезировании связано с увеличением функциональной нагрузки на опорные ткани. В естественных условиях жевательная нагрузка приводит к вектору сил, направленному по оси зуба. Зуб хорошо приспособлен к такого рода нагрузке. В случае мостовидного протеза к имплантату прикладывается, кроме вектора силы, момент пары сил. Если указанный момент превосходит некоторое критическое значение, то происходит расшатывание имплантата и наступает атрофия костной основы.

Причины возникновения патологических процессов при функционировании протеза кроются, с одной стороны, в перегрузке костных тканей около шейки опорных имплантатов, а с другой стороны, в недогрузке костных структур альвеолярного гребня челюсти под протезом. Расчетно-клинические исследования показали, что минимальный уровень интенсивности напряжений, при котором не происходит атрофия альвеолярной кости из-за ее функциональной недогрузки равняется 1,6 МПа. Максимальные же напряжения, воспринимае-